

0 922379-1

На правах рукописи

**ФЕДЯЕВ Владимир Леонидович**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Казань – 2001

Работа выполнена в Институте механики и машиностроения  
Казанского научного центра Российской академии наук

Научный консультант: чл.-корр. РАН, профессор М.А.Ильгамов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор А.М.Елизаров

**НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ**



доктор технических наук,  
профессор А.В.Фафурин

доктор технических наук,  
профессор А.Г.Лаптев

Ведущая организация: Научный центр нелинейной волновой механики и  
технологии РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится "3" июня 2001 г. в "15" часов  
на заседании диссертационного совета по защите докторских диссертаций  
Д 212.079.01 при Казанском государственном техническом университете имени  
А.Н.Туполева по адресу: 420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10, КГТУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ им. А.Н.Туполева

Автореферат разослан "1" 06 2001 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор

П.Г.Данилаев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одна из важных проблем многих производств – проблема реконструкции, модернизации технологического оборудования. Особенно актуальна она в настоящее время в связи с необходимостью повышения эффективности установок, экономии дорогостоящих материалов и энергии, а также из-за ужесточения требований к надежности и безопасности конструкций, защите окружающей среды.

Общий подход к ее решению состоит в следующем. Первоначально рассматривается работа оборудования, выявляются его недостатки, возможные причины отказов; обращается внимание на особенности протекающих при этом технологических процессов. При необходимости и, если позволяют условия, проводятся дополнительные замеры, натурные либо лабораторные эксперименты.

Далее полученный таким образом материал обрабатывается и используется при конструировании соответствующих расчетных схем и математических моделей. Важно, чтобы схемы и модели были бы, с одной стороны, адекватны исследуемым объектам и процессам, с другой стороны, по возможности, просты и наглядными.

Математическое моделирование, вычислительные эксперименты позволяют уточнить влияние тех или иных факторов на работу оборудования, спрогнозировать его поведение при изменении условий эксплуатации, оценить эффективность предложений по модернизации. Более того, с помощью математических моделей могут быть оптимизированы отдельные параметры, выбраны наиболее рациональные варианты. Поэтому разработка новых и уточнение имеющихся моделей, методов решения соответствующих задач весьма актуальна.

Исследования, результатом которых является диссертационная работа, проводились при выполнении госбюджетных тем ИММ КазНЦ РАН “Разработка вопросов математического моделирования и управления технологическими процессами” (номер гос. рег. 01.86.0121347), “Разработка вопросов математического моделирования процессов тепломассообмена и совершенствования технологического оборудования” (номер гос. рег. 01.9.60000592), а также хозяйственных договоров с ЛВВМИОЛУ им. Ф.Э. Дзержинского (г. С.-Петербург), НПО “Волга” (г. Казань), ПО “Елаз” (г. Елабуга), АО “Нижнекамскнефтехим”, с предприятиями “Полимерхолодтехника”, “Вент”, “СТЭП” (г. Нижнекамск).

**Целью работы является:**

- развитие принципов модернизации теплотехнического оборудования на основе методов математического моделирования и вычислительных экспериментов;
- анализ работы волновых насосов, градирен, теплообменников и электродуговых печей (ЭДП);

- уточнение имеющихся, конструирование новых математических моделей, описывающих протекающие в них гидрогазодинамические, тепловые и другие процессы;
- развитие методов численного интегрирования уравнений движения жидкости в областях с подвижными границами;
- разработка предложений по совершенствованию названных выше технических систем.

Научная новизна диссертации, в целом, состоит в том, что совокупность исследуемых процессов рассматривается на основе методов математического моделирования комплексно.

Вместе с тем, предлагаются новые математические модели, описывающие:

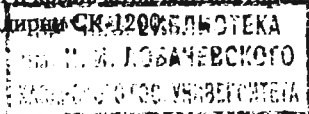
- условия на границах тонкого проницаемого тела, колеблющегося в вязкой жидкости;
- движение паровоздушной смеси в градириях;
- тепломассообмен при полете капель воды в восходящих потоках воздуха;
- полет и осаждение капель воды на пластинах каплеуловителей, течение пленок жидкости по ним;
- нагрев мостиков трубных досок, движение газа во входных камерах теплообменников;
- поведение парогазовой смеси и конденсата в трубах конденсаторов;
- проплавление колодцев, расплавление металлошхты, движение расплава в электродуговых печах.

Для решения части из возникших при этом задач на базе метода конечных элементов разработаны новые подходы расчета потоков жидкости в областях с подвижными границами, в том числе, с меняющейся с течением времени связностью.

С помощью данных подходов, других численных и аналитических методов получены новые результаты о течении жидкости в каналах с волнообразно колеблющимися стенками; движении паровоздушной смеси в градириях с воздушонаправляющими щитами; нагреве мостиков трубных досок теплообменников при разных способах защиты их рабочих поверхностей; о динамике фронта плавления – кристаллизации при нанесении защитных металлических покрытий на поверхности досок методом окунаия; о форме мениска, образующегося на границе ванны жидкого металла ЭДП под действием электрической дуги; о характере нагрева внутренней поверхности печного пространства дуговой печи.

Предложены также новые технические решения:

- прокачивания жидких сред волновыми насосами с частично проницаемым поршнем, со смещенными относительно друг друга деформируемыми участками стенок;
- охлаждения оборотной воды в градириях с помощью комбинированной системы;
- устройства форсунок для разбрызгивания воды, блоков оросителей, паро и каплеуловителей, лопастей и крыльчаток вентиляторов градириен;
- модернизации корпуса градири



- защиты трубных досок закалочно-испарительных аппаратов и котлов утилизаторов;
- совершенствования математического обеспечения АСУ ТП плавки в ЭДП.

**Практическая значимость работы.** Представленные в диссертации общий подход, расчетные схемы, модели и методы могут быть использованы в практике проектных организаций при создании нового, либо модернизации существующего оборудования, технических систем, аналогичных исследуемым.

Математические модели течений жидкости в полостях волновых насосов, методы их расчета применялись при разработке пропульсивных устройств, обеспечивающих минимальное возмущение продвигаемой среды, в том числе, с большой концентрацией примесей.

Предложения, касающиеся модернизации градирен, направлены на повышение эффективности работы этих установок. Так, комбинированная система, обеспечивая необходимое охлаждение воды, позволяет, вместе с тем, существенно сократить сроки капитального ремонта и материальные затраты. Она может быть взята за основу при решении вопросов реконструкции вентиляторных градирен в башенные. Данные результаты включены в 1998, 1999 г.г. Президиумом Российской академии наук в списки важнейших законченных исследований и разработок, готовых к практическому использованию.

Реализация технических решений по модернизации закалочно-испарительных аппаратов, котлов-утилизаторов, конденсаторов увеличивает надежность, продлевает срок службы данных теплообменников.

Математические модели и алгоритмы управления процессами, протекающими при плавке в электродуговых печах, будучи включенными в АСУ ТП, улучшают ее характеристики, что, в конечном счете, позволяет уменьшить затраты электроэнергии и материалов, повысить качество выплавляемого металла.

Применение названных, а также ряда других предложений подтверждается соответствующими справками и актами. Внедрению их во многом способствовали специалисты ЛВВМИОЛУ им. Ф.Э. Дзержинского Варварин С.В., Калмыков В.Н.; ОАО “Нижнекамскнефтехим” Мустафин Х.В., Рязанов Ю.И., Хисматуллин Н.И., Гильманов Х.Х., Шатилов В.М., Ухов Н.И., Ястребов М.М., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Комиссаров А.П., Шишкин А.А.; НПО “Волга” Минифаев И.Ш.

#### **На защиту выносятся:**

- общий подход модернизации технологического оборудования на основе результатов математического моделирования и вычислительных экспериментов;
- варианты метода СЭЛ на базе МКЭ для расчета потоков жидкости в областях с подвижными границами;
- постановка задач, граничные условия на проницаемых поверхностях, результаты расчета течений идеальной и вязкой жидкости в волновых насосах;
- методика оценки эффективности работы градирен;
- совокупность математических моделей, описывающих термогазодинамические и другие процессы, протекающие при работе градирен, теплообменни-

- ков, электродуговых печей, результаты расчета их характеристик;
- теоретическое обоснование эффективности применения метода электрошлакового подогрева, возможности наплавки защитных металлических покрытий на поверхности трубных досок теплообменников при погружении изделий в расплав;
- предложения по модернизации волновых насосов, градирен, отдельных их устройств, закально-испарительных аппаратов, котлов-утилизаторов и конденсаторов.

**Обоснованность и достоверность** результатов диссертации обеспечивается тем, что они основаны на общих фундаментальных законах и уравнениях физики. При получении их применялись строгие математические методы, численные алгоритмы и программы тестировались. В частных, либо предельных случаях найденные решения согласуются с имеющимися в литературе результатами, а также с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на следующих съездах, конференциях, школах, симпозиумах и семинарах:

- IV Всес. съезд по теор. и прикл. механике (г. Киев, 1976);
- Респ. конф. “Механика сплошных сред” (г. Набережные Челны, 1982);
- Конф. молодых ученых КФТИ КФАН СССР (г. Казань, 1984, 1986);
- IX Межд. конф. по нелинейным колебаниям (г. Киев, 1984);
- I Всес. симп. “Нелин. теория тонкост. конструкций и биомеханика” (г. Култасы, 1985);
- II Всес. конф. “Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике” (г. Киев, 1985);
- Всес. школа “Гидродинамика больших скоростей” (г. Чебоксары, 1986);
- VII Дальневост. конф. по мягким оболочкам (г. Владивосток, 1987);
- II Респ. науч.-техн. конф. “Механика машиностроения” (г. Брежнев, 1987);
- Семинар “Эффективные технол. процессы и оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин” (г. Пенза, 1991);
- VII Всес. съезд по теор. и прикл. механике (г. Москва, 1991);
- Int. conference on Advanced and laser techn. ALT - 92 (Moscow, 1992);
- Int. conference ENERGEX - 93 (Seoul, Korea, 1993);
- XII Межд. школа “Модели сплошной среды” (г. Казань, 1993);
- Int. conference on Electr. furnace (Nashvill, USA, 1994);
- Респ. конф. “Надежность металлов ответственных элементов оборудования ТЭС” (г. Казань, 1994);
- IV Int. conference Lavrentyev Readings on mat., tech., physics (Kazan, 1995);
- I Межд. конф. “Модели механики сплошной среды, вычислительные технологии и автоматизированное проектирование в авиа- и машиностроении” (г. Казань, 1997);
- Ежегод. Межд. конгресс “Новые высокие технологии для газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи” CITOGIC-98 (г. Казань, 1998);

- VII Межд. конф. по энергосбережению при модернизации градирен (г. Нижнекамск, 1999);
- Всерос. науч. конф. "Краевые задачи и их приложения" (г. Казань, 1999);
- Школа-семинар "Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении" (г. Казань, 1999, 2000);
- Итоговые науч. конф. Казанского научного центра РАН (1983-2000); Казанского государственного университета (1992-1996), Казанского филиала МЭИ (ТУ) (1993-1996), Казанской сельхозакадемии (1993-1995);
- Научные семинары Института механики и машиностроения КНЦ РАН, руководимые член.-корр. РАН М.А. Ильгамовым.

По теме диссертации опубликовано 42 работы, в том числе 1 препринт, 30 статей и докладов, 8 тезисов, получено 2 патента РФ и 1 свидетельство на полезную модель.

Большая часть результатов диссертации получена в лаборатории моделирования технологических процессов ИММ КНЦ РАН, поэтому тема ее тесно связана с разрабатываемой этим коллективом тематикой. Автору в данной работе принадлежат выбор объектов исследования, постановка задач, разработка отдельных методов решения, получение аналитических оценок и части численных результатов, анализ и обсуждение их, а также предложения по модернизации рассматриваемого теплотехнического оборудования.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем ее составляет 415 страниц, в том числе 199 рисунков, 6 таблиц. Список литературы содержит 258 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отмечается актуальность проведенных исследований, сформулирована цель работы, названы ее новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Даются также сведения о структуре и содержании диссертации, где опубликованы и докладывались ее основные результаты.

**Первый раздел диссертации** носит общий характер. В нем с единых позиций рассматривается работа разного технологического оборудования: волновых насосов, градирен, кожухотрубных теплообменников, электродуговых печей. Приводится информация об устройстве и особенностях процессов, протекающих в них.

При анализе данных систем обращается внимание на следующие обстоятельства. Во-первых, движение жидких и газообразных сред в большинстве из этих аппаратов вызывается, помимо перепада давления на входе и выходе из корпуса, рядом других факторов, которые оказываются, зачастую, доминирующими (волнообразные деформации поршня насоса, тяга вентиляторов градирен, напор горящих дуг, электромагнитные поля в ванне жидкого металла ЭДП и т.д.).

Во-вторых, при работе названных установок существенным является взаимодействие элементов систем, механическое воздействие друг на друга, влия-

ние окружающей среды. Так в волновых насосах колебания пластины (поршня) зависят от течения прокачиваемой жидкости, ограничений со стороны корпуса насоса.

В градириях механическое взаимодействие наиболее ярко выражено в задаче о движении воздуха. На параметры воздушных потоков влияют форма и размеры корпуса градири; сопротивление оросителя, каплеуловителя, капель воды при их полете.

В отличие от градирен, в теплообменниках газообразная и жидкая среды непосредственно не соприкасаются. Прямое динамическое воздействие их на детали аппаратов в штатных ситуациях, в принципе, несущественно. Основным является термосиловое нагружение. Однако величина его во многом определяется характером движения, параметрами газа и воды. Поэтому опосредованное влияние этих сред на работу и состояние теплообменных аппаратов значительно. Кроме того, длительное воздействие потоков газа и жидкости на элементы теплообменников способствует охрупчиванию поверхностных слоев, коррозионному износу.

При плавке металла в ЭДП доминируют тепловые процессы. Среди задач механики, важных для понимания и описания плавки, выделим следующие: движение печного газа в свободном пространстве печи; воздействие газовых потоков на поверхность жидкого шлака, расплав металла; перемешивание расплава.

Наконец, в-третьих, почти во всех случаях работа рассматриваемого оборудования сопровождается теплообменом. В градириях превалирует теплопередача за счет фазовых переходов, испарения воды с поверхности капель, пленок, струек. В теплообменниках тепло перетекает через стенки трубок, омываемых с одной стороны охлаждающей жидкостью и обдуваемых с другой горячим газом. Наряду с теплопроводностью, конвективным переносом тепла в высоко нагруженных теплообменниках, например, закалочно-испарительных аппаратах (ЗИА), важным может оказаться и радиационный теплообмен. Наиболее сложные тепловые процессы протекают при плавке в ЭДП. До высоких температур нагревается корпус печи, электроды, металл, печной газ. При расплавлении шихты происходят фазовые переходы, при движении расплава и печного газа имеет место конвективный теплоперенос. Однако основным в печах является, безусловно, радиационный теплообмен.

Все сказанное учитывается далее при математическом моделировании процессов, протекающих в исследуемых установках. Поскольку рабочие тела являются, как правило, неоднородными, многофазными структурами, для описания их поведения привлекается теория многофазных сред. Выделяются гомогенные и гетерогенные двухфазные смеси (газовзвеси, содержащие твердые частицы или капли жидкости; пузырьковые жидкости, насыщенные пористые тела и конденсированные среды). Наряду с основными допущениями, типичными для гетерогенных смесей, принимаются дополнительные. Считается, что включения имеют сферическую форму, одинаковый радиус; объемная концентрация их мала; хаотическое вращательное движение, деформации включений



не учитываются; между ними нет взаимодействия, столкновений, слипания или дробления; плотности фаз значительно отличаются.

С учетом названных допущений, записываются в общем виде уравнения сохранения масс, импульсов, энергии и состояния газовзвеси и пузырьковой жидкости. Приводятся также математические модели фильтрации газа и несжимаемой жидкости в пористых зернистых насыщенных средах; соотношения, описывающие поведение гомогенных смесей, физико-механические процессы в конденсированных средах (твердых деформируемых телах).

Данные уравнения дополняются начальными и граничными условиями. Качественно анализируются варианты контакта двух сред, являющихся гетерогенными смесями. Подробно рассматриваются граничные условия на тонких пористых телах, находящихся в вязкой жидкости. В результате предельного перехода при стремлении толщины тела к нулю отыскиваются условия сопряжения характеристик жидкости на проницаемых поверхностях. В случае неизо-термических потоков к этим соотношениям добавляются условия теплообмена на границах расчетных областей.

В предположении, что решение рассматриваемых задач существует и единственно, обсуждаются, в общем, методы их интегрирования. Выделяется три подхода: метод анализа размерностей; методы, связанные с отысканием аналитических решений и оценок; подходы, основанные на использовании численных (дискретных) методов.

**Второй раздел** посвящен анализу работы и совершенствованию волновых насосов. Приводится краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований в этом направлении, формулируются задачи о движении жидкости в полостях насосов первого типа, когда волнообразно деформируются стенки  $\Gamma^+$ ,  $\Gamma^-$  (рис. 1а) и второго, прокачивание жидкости в котором обеспечивается поршнем  $\Gamma$ , колеблющемся в виде бегущей волны (рис. 1б).

Предварительно предполагается, что жидкая среда однофазная, идеальная, а течение ее потенциально. В соответствии с методом конечных элементов в исходной задаче, записанной относительно потенциала скоростей  $\varphi$  и функции тока  $\psi$ , осуществляется переход к вариационной формулировке; в области интегрирования строится базовая (неподвижная эйлерова) сетка (рис. 2а). Для учета колебаний поверхности ВС предлагается три способа. Согласно первого участок границы ВС, заключенный между двумя соседними вертикальными линиями сетки, аппроксимируется отрезком прямой, проходящей через точки пересечения ВС с данными линиями. При условии, что эти прямые не пересекают одновременно верхнюю и нижнюю стороны ячейки, производится в каждый момент времени маркировка элементов. Различаются внутренние, поверхностные и внешние (пустые) элементы. Внутренние элементы-ячейки, полностью заполненные жидкостью. Они не содержат подвижной границы ВС. Через поверхностные элементы проходит контур ВС. Считается, что в области, где находятся внешние элементы, жидкость отсутствует. К сожалению, этот способ применим лишь для решения задач о течении жидкости в канале, часть стенки

которого колеблется. Причем неподвижные участки должны быть прямолинейны.

С целью расширения возможностей данного подхода во втором и третьем способах четырехугольная базовая сетка заменяется на треугольную, которая строится путем проведения диагоналей через правые верхние узлы каждого четырехугольника исходной сетки. Во втором способе, как и в первом, элементы в процессе маркировки подразделяются на внутренние, поверхностные и внешние. Типичный поверхностный элемент показывается на рис. 2*b*. Здесь  $L_1, L_2$  – локальные координаты;  $P^*, P^{**}$  – точки пересечения ВС со сторонами элемента.

В третьем способе в тех четырехугольниках базовой сетки, через которые проходит ВС, все исходные треугольные элементы считаются пустыми и из решения исключаются. На их месте строятся другие, дополнительные треугольные элементы. При этом в точках пересечения со сторонами четырехугольников прямой, аппроксимирующей ВС, вводятся два дополнительных узла (рис. 2*c*).

Последний способ, по всей видимости, более точный, чем два предыдущих, поскольку вблизи подвижной границы, в области наибольших градиентов, происходит сгущение сетки. Важно также то, что значения потенциала и функции тока находятся непосредственно на колеблющемся контуре, проще отыскиваются элементные и поверхностные вклады.

Названные методики реализованы в виде комплекса программ для ПЭВМ. Проведено их тестирование.

В качестве примера на рис. 3*a* показываются поля скоростей потоков жидкости в полостях насосов первого типа при разных направлениях фазовой скорости волны  $s$ , а также второго типа, когда варьируется форма корпуса и закон движения поршня (рис. 3*b, c*). Здесь штриховыми линиями изображается положение колеблющейся границы в следующий по отношению к рассматриваемому момент времени. Сравнение расчетных полей скоростей жидкости с результатами визуализации потоков вблизи волнообразно колеблющихся пластин (рис. 4) подтверждает качественное согласие теоретических и экспериментальных данных.

Описанный выше подход распространяется также на случай вязкой жидкости. В предположении, что течение в полости волнового насоса ламинарно, для отыскания в ней функции тока  $\psi$ , завихренности  $\zeta$  и давления  $p$  берутся уравнения

$$\Delta\psi = -\zeta, \quad (1)$$

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{\partial\psi}{\partial y} \frac{\partial\zeta}{\partial x} - \frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{\partial\zeta}{\partial y} = \nu\Delta\zeta, \quad (2)$$

$$\Delta p = 2\rho \left( \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial\psi}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \quad (3)$$

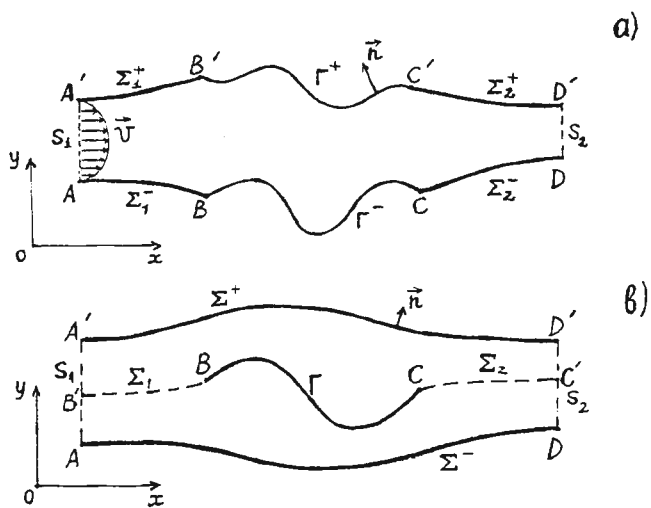


Рис. 1

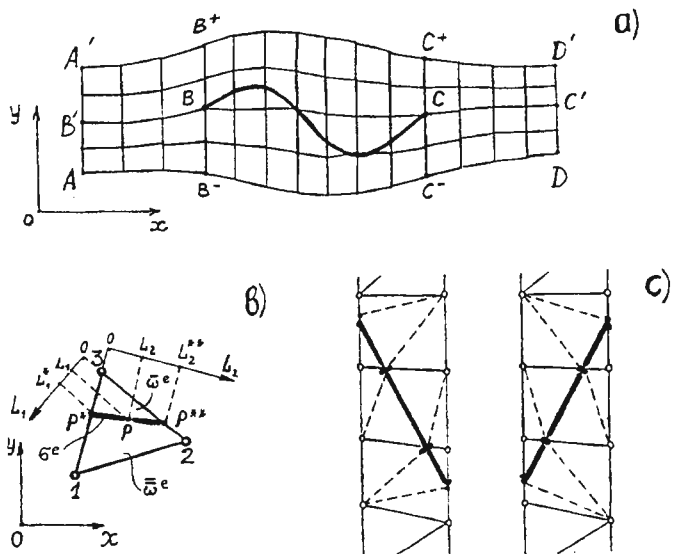


Рис. 2

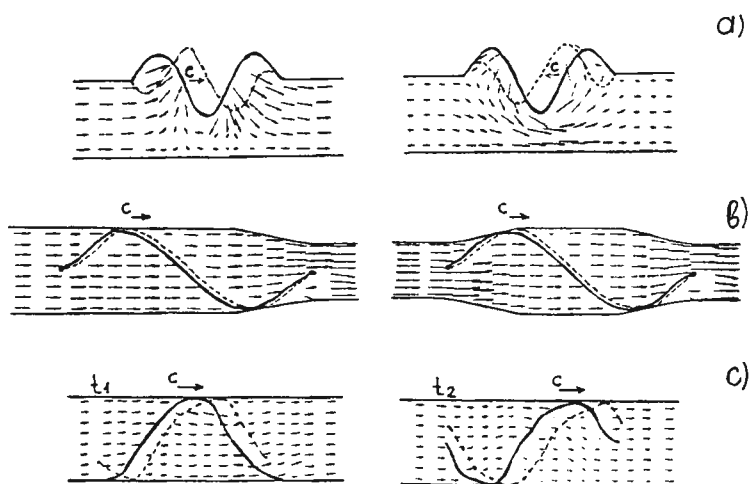


Рис. 3

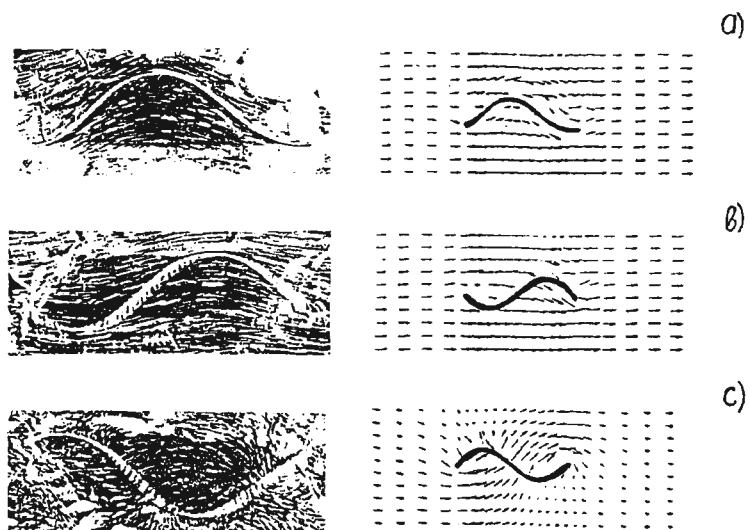


Рис. 4

с соответствующими начальными и граничными условиями. В выражениях (1) – (3)  $\rho$  – плотность,  $\nu$  – коэффициент вязкости жидкости,  $t$  – время,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Тестирование разработанных программ проводится на задачах о движении вязкой жидкости в квадратной полости со сдвигающейся стенкой и в канале с сужением.

При анализе особенностей течений в насосах выделяются случаи, когда направления скоростей фазовой волны подвижной границы и потока жидкости на входе либо совпадают, либо противоположны (реверс). Часть полученных результатов для разных законов колебания стенок представляется на рис. 5.

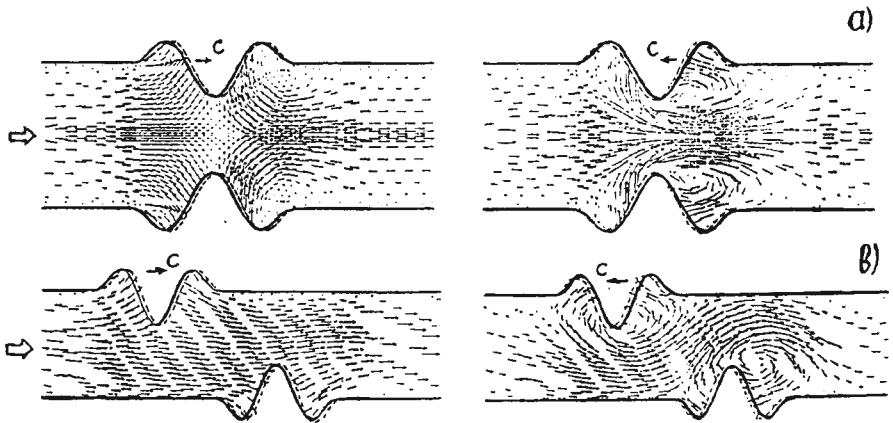


Рис. 5

Из приведенных данных видно, что при симметричных колебаниях, движении волны по потоку, в передней части насоса происходит как бы всасывание жидкости, в задней – выбрасывание. Во втором случае ситуация меняется: в передней части насоса жидкость устремляется от стенок к центру, а затем вдоль оси к выходу в виде струи (рис. 5а). При несимметричных колебаниях стенок (рис. 5б) возвратных течений жидкости не наблюдается, движение ее в целом более плавное и регулярное. Следует заметить, что эти результаты качественно согласуются с полученными ранее решениями задач о течении идеальной жидкости; с данными, имеющимися в литературе.

В третьем разделе рассматриваются вопросы модернизации градилен. Обсуждаются основные тенденции решения этих проблем, критерии оценки эффективности работы градилен. С учетом того, что назначение градилен как теплообменных аппаратов состоит в охлаждении оборотной воды при контакте ее с атмосферным воздухом, принимается следующий принцип сравнения: лучшей считается градиня, обеспечивающая больший перепад температур для большего количества воды при наихудших внешних условиях. В соответствии с этим

принципом, с помощью метода анализа размерностей находится технологический критерий эффективности

$$M_T = M_1 \cdot M_2^{0.35} \cdot M_3^{1.6}. \quad (4)$$

Здесь  $M_1 = \Delta\theta \cdot \theta_0^{-1}$ ,  $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_1$  ( $\theta_0, \theta_1$  – температура воды на входе и выходе из градири);  $M_2 = W_m \cdot W_{gm}^{-1}$  – отношение массовых расходов воды и воздуха;  $M_3 = \rho_0 \cdot (\Delta\rho)^{-1}$ ,  $\Delta\rho = \rho_0 - \rho_g$  ( $\rho_0 = \rho_H(\theta_0)$ ,  $\rho_g = \varphi\rho_H(\theta_g)$ ,  $\rho_H(\theta)$  – функция насыщения;  $\theta_g, \varphi$  – температура, относительная влажность воздуха).

Для учета экономических аспектов работы градирен предлагается комплексный критерий

$$M_K = M_T \cdot M_C, \quad (5)$$

где  $M_C$  – критерий экономической (стоимостной) эффективности.

Названные критерии (4), (5) применяются далее при оценке эффективности работ по реконструкции градирен СК-1200, проводимых на ОАО “Нижнекамскнефтехим”. Рассматриваются исходная градирия (рис. 6) с деревянными каплеуловителем 1, оросителем 2, системой водораспределения 3 и модернизированные, в которых вода разбрызгивается с помощью форсунок, устанавливаются полиэтиленовые каплеуловитель и ороситель производства ТОО “Полимерхолотехника”, либо используется брызгальный (эжекционный) способ охлаждения ее.

Обработка многочисленных результатов замеров основных характеристик этих градирен показала, что наибольшей технологической эффективностью обладает исходная градирия ( $M_T = 0.63$ ), у модернизированных соответственно  $M_T = 0.62$  и  $M_T = 0.51$ . Значения критерия  $M_K$  этих градирен также меньше, чем исходной.

Следуя предлагаемому в данной работе подходу модернизации теплотехнического оборудования, построим предварительно математические модели и расчетные схемы процессов теплообмена, протекающих в исследуемых градириях. При условии, что имеет место осевая симметрия, в качестве расчетной выбирается область  $\Omega$ , состоящая из подобластей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  (рис. 7). В свою очередь в  $\Omega_1$  выделяются входной участок  $\Omega_1^B$ , область активного теплообмена (ороситель)  $\Omega_1^O$  и участок, занятый каплеуловителем  $\Omega_1^K$ . Поскольку практически во всем объеме градирии находятся структуры, препятствующие движению воздуха (капли, струйки воды, ороситель и т.д.), считается, что  $\Omega$  занято некоторой пористой средой с переменной по координатам проницаемостью  $k$ . В результате, после ряда упрощений, для отыскания плотности  $\rho$ , скоростей  $v_r, v_z$ , возмущений давления в воздухе  $p' = p + g\rho^0 z - p_0$  лучшим соотношения

$$\rho = \rho^0 (1 - \beta\theta'_g), \quad (6)$$

$$v_r = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial r}, \quad v_z = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p'}{\partial z} - \beta g \rho^0 \theta'_g \right), \quad (7)$$

$$\operatorname{div}(k \nabla p') = \beta g \rho^0 \frac{\partial}{\partial z} (k \theta'_g), \quad (8)$$

где  $\theta'_g = \theta_g - \theta_g^0$ ;  $\theta_g^0, \rho^0$  – температура, плотность воздуха снаружи градирни;  $\mu$  – вязкость,  $\beta$  – коэффициент объемного расширения.

Последнее выражение (8) является уравнением Пуассона, граничные условия для которого при вентиляторном режиме работы градирни имеют вид:

$$\begin{aligned} S_1: \quad p' &= p_1 - p_0 + g \rho^0 z; \quad S_2: \quad p' = p_2 - p_0 + \rho^0 g h; \\ \Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3: \quad v_n &= v_n(p') = 0; \\ \Gamma: \quad v_{z\Gamma} &= v_{z\Gamma}, \quad p'_{\Gamma} - p'_{\Gamma} = \Delta p. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь  $p_1, p_2$  – давления на входе, выходе из градирни,  $\Delta p$  – перепад давления на вентиляторе,  $h$  – высота градирни.

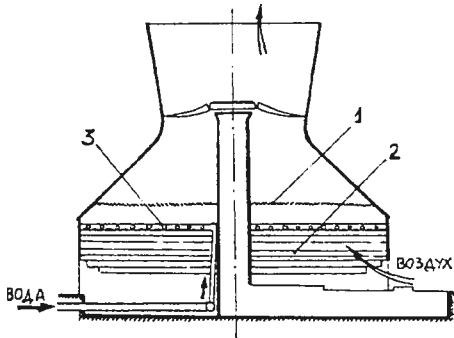


Рис. 6

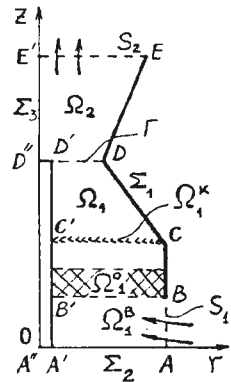


Рис. 7

Охлаждение воды в рассматриваемых градирнях происходит в оросителях ( $\Omega_1^0$ ) и при полете капель в свободном пространстве. Теплообмен в  $\Omega_1^0$  описывается совокупностью балансовых соотношений<sup>1</sup>, позволяющих по известным характеристикам насадок оросителя, параметрам воды и воздуха на входе в них найти на выходе температуры воды  $\theta_1$  и воздуха  $\theta_g^1$ , его влажность.

Температура воды  $\theta$  летящих в градирне капель в предположении, что тепловые процессы одномерны, отыскивается из задачи:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (0 < t < t_1, 0 < r \leq a(t)), \quad (10)$$

<sup>1</sup> Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градири промышленных и энергетических предприятий – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.

$$t = 0 : \theta = \theta_0, \quad (11)$$

$$r = 0 : r^2 \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \quad r = a : \theta = \theta^*, \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = \rho L w - \alpha (\theta - \theta_g);$$

где  $r$  – радиальная координата в капле,  $t$  – время,  $t_1$  – время полета капли,  $a = a(t)$  – радиус капли,  $\lambda = \lambda / c\rho$  – температуропроводность,  $\theta^*$  – температура фазового превращения,  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $L$  – скрытая теплота испарения,  $w = \frac{da}{dt}(a(0) = a_0)$  – скорость движения межфазной границы ( $w = -\gamma(\rho^* - \rho_g)$ ),  $\gamma$  – коэффициент массоотдачи,  $\rho^* = \rho_H(\theta^*)$ .

Решения данной задачи позволяют, вместе с тем, оценить концентрацию паров  $\rho_g$  и температуру газа  $\theta_g$  в объеме, занятом каплями. В частности, показывается, что во входной камере градирни  $\Omega_1^B$  для безразмерных величин

$$R = (\rho_g - \rho_g^0) (\rho^* - \rho_g^0), \quad T = (\theta_g - \theta_g^0) (\theta^* - \theta_g^0)$$

имеют место зависимости

$$R = 1 - \exp(-EX), \quad (12)$$

$$T = 1 - \exp(-DX) - \frac{B}{D-E} (\exp(-EX) - \exp(-DX)), \quad (13)$$

где  $X = (r - r_0) / r_0$ ,  $r_0$  – радиус основания корпуса градирни,  $\rho_g^0$  – концентрация паров воды в атмосферном воздухе;  $B, D, E$  – безразмерные комплексы, характеризующие основные теплофизические параметры испарения воды и нагрева воздуха.

В дополнение к названным приводятся также модели полета, осаждения капель, течения пленки жидкости по поверхности профиля решетки каплеуловителя. Особенности их состоят в том, что при анализе полета капель  $M$  в ячейке периодичности каплеуловителя  $\omega_K$  (рис. 8) предварительно рассчитываются

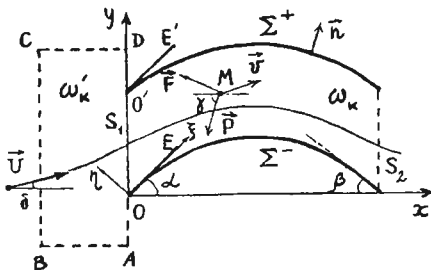


Рис. 8

траектории частиц в области  $\omega'_K$  перед каплеуловителем, выделяются капли, попадающие в створ  $OO'$ , находятся начальное положение и скорости их в сечении  $S_1$ . Жидкость пленки, образующейся на участках осаждения капель, считается вязкой. Движение ее определяется действием воздушного потока, сил тяжести, ударами капель по свободной поверхности.

Поскольку все приведенные модели так или иначе связаны между собой, расчет основных характеристик градирни производится итерационно. В первом



приближении распределение температуры воздуха  $\theta_g$  в градирне считается известным.

Итак, представляя далее предложения, направленные на повышение эффективности работы градирен, обратимся вначале к водоохлаждающим устройствам: системам водораспределения и оросителям. В рассматриваемых градирнях СК-1200 вода подается в центральную часть, поднимается по трубам, расположенным около шахты, растекается по сечению градирни (рис. 6). Такой способ распределения воды обладает очевидными недостатками. Чтобы избавиться от них, предлагается новая система, суть которой состоит в том, что вода распространяется по сечению градирни последовательно, на трех уровнях. На первом, низшем уровне она поступает в три сектора градирни, затем поднимается и распределяется в секторах с помощью двух кольцевых коллекторов, расположенных на уровне земли. После чего по стоякам вода поднимается на третий уровень (над оросителем), где растекается по радиальным и окружным трубам к форсункам.

Для того, чтобы избежать забивки форсунок, обеспечить устойчивую работу их при различных гидравлических напорах предлагается новая конструкция форсунки. Основные элементы ее – пластинки, изогнутые специальным образом. За счет данного изгиба обеспечивается закрутка потока, разбрызгивание воды. Поскольку между пластинками имеются зазоры, вода, даже при очень малых напорах, вытекает через них. В случае больших напоров, будучи упругими, пластинки отклоняются в сторону, обеспечивая большую пропускную способность.

Результаты работы разных оросителей, приведенные в литературе, опыт эксплуатации насадок на ОАО “Нижнекамскнефтехим” показывают, что по совокупности характеристик наилучшими являются оросители, блоки которых собираются из тонких гофрированных листов либо решетчатых элементов разной конфигурации. С учетом сказанного предлагаются две новые конструкции насадок. В первой базовыми элементами являются гофрированные перфорированные специальным образом пластины шестиугольные или квадратные в плане, во второй – трубки треугольного сечения, отдельные участки которых выдвигаются в разные стороны.

Вместе с тем, с помощью предложенных математических моделей и расчетных схем (рис. 7) в работе решается также задача рационального размещения блоков оросителя в градирнях СК-1200. При этом варьируется по радиусу толщина слоя оросителя постоянного объема. На рис. 9а приводится МКЭ сетка, характерные картины изолиний давления в наиболее благоприятном случае, когда толщина оросителя уменьшается к центру (рис. 9в). Действительно, в этом случае, как показывают расчеты, перепад температуры охлаждаемой воды увеличивается, приблизительно на 10%.

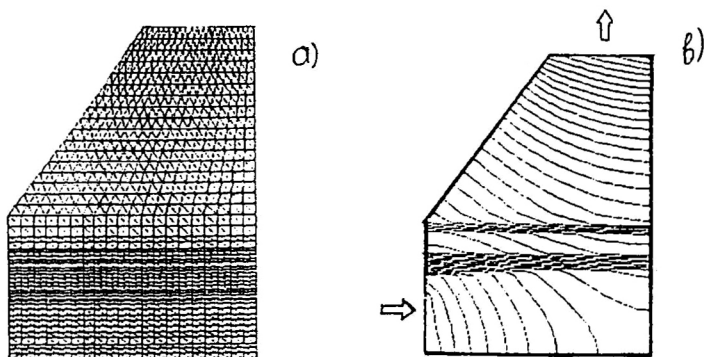


Рис. 9

Эффективность работы градирен может быть увеличена и за счет воздухо-направляющих щитов. В диссертации обсуждаются разные конструкции этих устройств. Среди них выделяются, как наиболее перспективные,  $\Lambda$ -образные щиты и щиты в виде колец, размещаемых под оросителем. Согласно расчетов, установка таких щитов приводит к увеличению расхода воздуха в градири приблизительно на 7%, к снижению температуры охлажденной воды на 5% и более.

Представленные выше предложения ориентированы на модернизацию оросительных градирен. Поскольку оросители достаточно дороги, создают большое аэродинамическое сопротивление, естественно желание свести их объемы до минимума либо вообще исключить, переходя на брызгальные способы охлаждения.

Но последние, зачастую, не обеспечивают должного температурного перепада воды, обладают другими недостатками. В этой ситуации могут быть полезны комбинированные системы, в которых сочетаются оросительный и брызгальный способы охлаждения оборотной воды. В настоящей работе предлагается несколько вариантов таких систем. Один из самых простых показывается схематично на рис. 10. Здесь 1 – кольцевые водораспределительные коллектора, 2 – гребенки с форсунками, 3 – кольцевые воздухонаправляющие щиты, 4 – решетки для дробления капель воды.

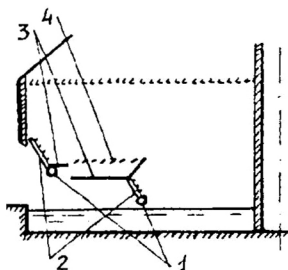


Рис. 10

Поведение воздуха в градирне СК-1200 с комбинированной системой охлаждения иллюстрирует рис. 11а, на рис. 11а показывается сетка конечных элементов. Наблюдаются, как и следовало ожидать, наибольшие значения скоростей воздуха вблизи входных окон градирни. Однако на удалении 2 – 3 м от них, над воздухонаправляющими щитами скорости меняются по радиусу слабо. Это важно, поскольку именно здесь, в основном, воздух контактирует с водой, происходит интенсивный тепломассообмен. Согласно данным расчетов, в такой градирне при температуре атмосферного воздуха  $\theta_g^0 = 20^\circ\text{C}$ , влажности  $\varphi = 0.55$  вода с расходом  $W = 9000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , начальной температурой  $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$  охлаждается до  $\theta_1 = 27.7^\circ\text{C}$ . При этом технологический критерий эффективности в соответствии с формулой (4) будет 0.6.

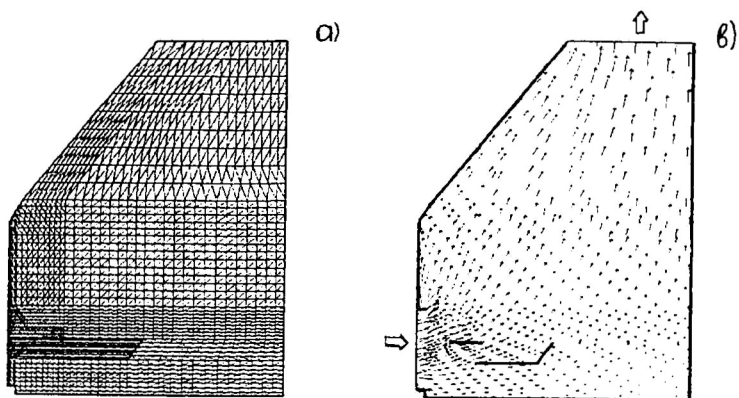


Рис. 11

Высокая эффективность предложенной системы подтверждается результатами натурных экспериментов. Согласно замеров, выполненных в летнее время на градирнях с деревянным (рис. 6), полиэтиленовым оросителем производства ТОО «Полимерхолодтехника» и с комбинированной системой охлаждения воды, величина критерия  $M_T$  последней превышает значение  $M_T$  градирни с полиэтиленовым оросителем приблизительно на 8%.

Кроме того, комбинированная система, как показал опыт ее эксплуатации, обладает дополнительно следующими преимуществами:

- эффективно работает в башенном режиме, без вентилятора, что позволяет значительно экономить электроэнергию и ресурсы вентиляторной установки, в перспективе решать вопросы ее демонтажа;

- установка задвижек на кольцевых коллекторах позволяет регулировать распределение воды по рабочему пространству, дает возможность оперативного реагирования на изменения погодных условий, расхода воды;
- при изготовлении этой системы требуется по сравнению с обычной оросительной меньше (приблизительно в 2 раза) металлопроката, в 4 – 5 раз полиэтилена, гораздо меньше объемы и, соответственно, сроки строительных работ.

Далее в работе рассматриваются вопросы совершенствования каплеуловителей. Выделяются, как наиболее распространенные, каплеуловители жалюзийного типа (решетчатые). Предварительно осуществляется апробация моделей, описывающих движение воздуха, полет и осаждение капель в ячейке периодичности каплеуловителя (рис. 8), затем рассматриваются характеристики каплеуловителей из трапецевидных пластин (лопаток).

Анализ полученных результатов позволил выявить особенности работы этих каплеуловителей, наметить пути их модернизации. В ходе выполнения серии вычислительных экспериментов найдены рациональные форма и размеры новых V – образных лопаток. На рис. 12а,б,в показывается их конфигурация, приводятся траектории полета капель радиусом  $a = 30, 50, 90$  мкм соответственно.

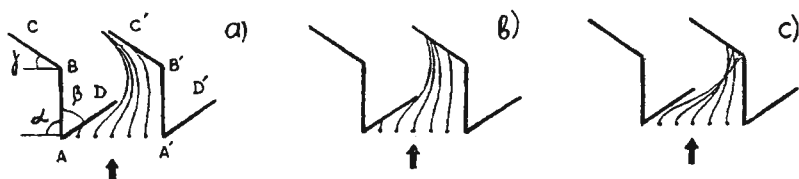


Рис. 12

Предложенный каплеуловитель, будучи эффективнее, чем каплеуловитель с трапецевидными пластинами, обладает еще тем преимуществом, что для его изготовления требуется приблизительно на 60 – 70% меньше материалов, при этом легко обеспечивается необходимая жесткость блоков.

Если проблемы улавливания капель в градирнях так или иначе решаются, то вопросы предотвращения выбросов воды в виде пара остаются пока открытыми. С учетом того, что устройства для конденсации паров должны быть предельно простыми и дешевыми, представляются две системы. В первой за основу берется V – образный профиль решетки каплеуловителя (рис. 12а), участок BD которого перекрывается. По получившимся таким образом трубкам продувается атмосферный воздух. Вторая система может считаться дополнительной к первой. Она состоит из совокупности расположенных вокруг корпуса градирни над каплеуловителем кольцевых полостей, в которые холодный воздух поступает снизу и выходит через отверстия в верхней части.

Заметим, что названные системы способны лишь уменьшить выбросы воды. Тем не менее, поскольку для реализации их требуются сравнительно небольшие затраты, аэродинамическое сопротивление паровоздушного потока в градирне практически не увеличивается, можно сделать вывод о целесообразности внедрения данных систем.

Известно, что эксплуатация вентиляторных установок градирен, особенно крупногабаритных, сопряжена с большими трудностями. В работе обсуждается несколько направлений, связанных с решением этих проблем.

В силу того, что к надежности механизмов вентиляторных установок предъявляются высокие требования, предлагаются новые, с повышенными прочностными характеристиками конструкции лопастей, крыльчаток вентиляторов, их каркасов. На рис. 13а,в показываются фрагмент одной из лопастей и ее сечение соответственно. Здесь помечены цифрами 1, 2 участки оси, передней трубки; 3 – верхняя часть кронштейна; 4, 5 – верхние продольная и поперечная полки; 6 – нижняя часть кронштейна; 7 – нижняя продольная полка; 8, 9 – верхний и нижний листы обшивки; 10 – кожух, охватывающий ось и переднюю трубку. Основные отличия этой лопасти от исходной, аналогичной крылу самолета, состоят в том, что она утончается, объемной остается лишь передняя часть, хвостовая состоит из двух листов; отсутствуют лонжероны и нервюры как таковые, их заменяют кронштейны. Необходимо подчеркнуть, что по отношению к крутящим моментам кожух 10, верхние и нижние листы 8, 9 действуют как пластинчатые пружины, аналогично пластинам рессор.

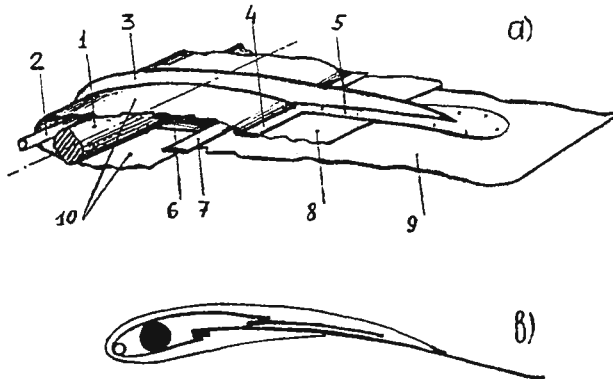


Рис. 13

Если лопасть по форме останется прежней, объемной, ее жесткость на изгиб и кручение можно существенно увеличить, заменив обычный каркас с перпендикулярно расположенными лонжеронами и нервюрами на новый. Два варианта конструкции такого каркаса показываются на рис. 14, причем в последнем случае устройство оси схоже с рессорой. Следует ожидать, что в условиях

интенсивных динамических нагрузок составная ось будет работать лучше, чем сплошная.

Развивая данные идеи применительно к каркасам крыльчаток вентиляторов градирен; учитывая, что самыми ненадежными в них являются места крепления осей в ступицах, предлагаются новые конструкции таких каркасов (рис. 15). При этом выделяются два случая, когда каркасы лопастей имеют непарное (рис. 15а) либо парное (рис. 15б) число лонжеронов. Особенность этих конструкций заключается в том, что все центральные лонжероны 1 собираются в одну точку, а крайние лонжероны 2 смежных лопастей соединяются друг с другом или с изгибом переходят друг в друга. В месте стыковки (изгиба) указанные лонжероны жестко соединяются с радиальными перемычками 3.

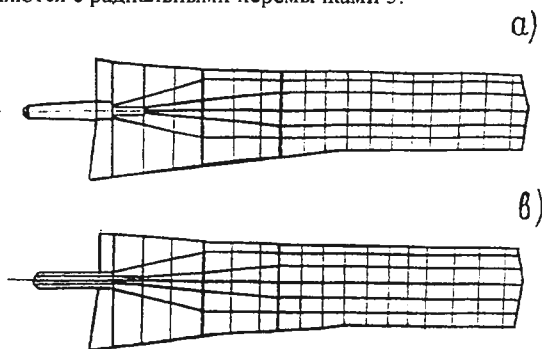


Рис. 14

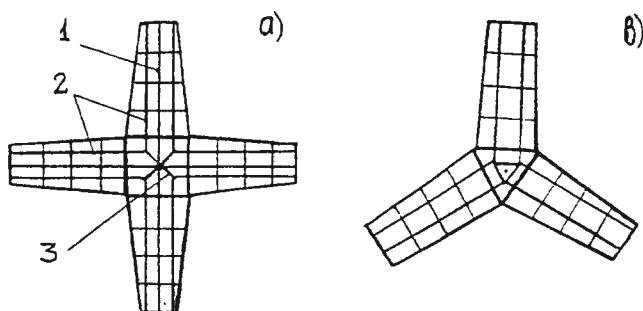


Рис. 15

В рамках следующего направления при условии, что исходный корпус градири (рис. 6) заменяется на новый (рис. 16а), предлагается использовать вместо одной несколько небольших вентиляторных установок, обеспечивающих необходимый перепад давления. На рис. 16а показываются места размещения 1 шести малогабаритных вентустановок на специальных площадках 2.

Наконец, как показывают расчеты, если высота корпуса увеличивается, ему придается форма, представленная на рис. 16в, используется комбинированная система охлаждения воды (рис. 10), то вентиляторы в ряде случаев могут не устанавливаться.

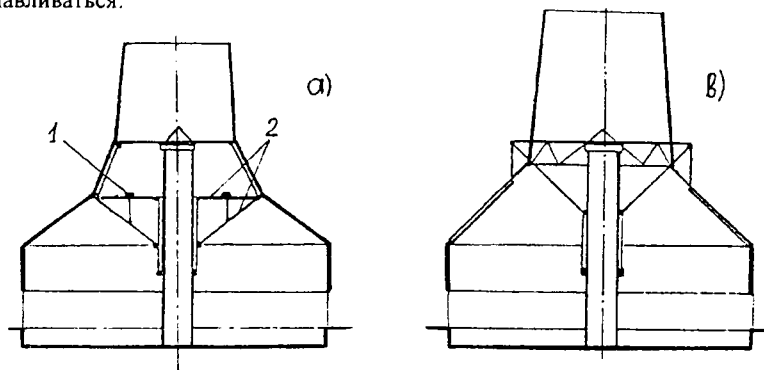


Рис. 16

**Четвертый раздел** посвящен вопросам реконструкции теплообменников. Рассматривается работа закалочно-испарительных аппаратов (ЗИА) фирмы “Борзиг” (рис. 17а), котлов-утилизаторов (рис. 17б) и четырехходовых конденсаторов (рис. 17с). Отмечается, что в высоконагруженных теплообменниках (ЗИА, котлы-утилизаторы) достаточно часто наблюдается выпучивание нижней трубной доски, образование радиальных трещин на ее мостиках, разрыв сварных швов с появлением дугообразных кольцевых трещин, утончение и разрушение трубок вблизи этой доски. Основной недостаток конденсаторов – забивка коксом межтрубного пространства при прохождении в нем контактного газа.

Для анализа процессов, протекающих при работе данного оборудования, с целью уточнения причин названных отказов предлагается ряд математических моделей. Это, во-первых, соотношения для оценки теплообмена во входных камерах (диффузорах) аппаратов, полученные на основе электрической аналогии; уравнения для расчета температур газа и стенок трубок. Во-вторых, модели нагрева мостиков трубных досок. При построении их в трубной доске выделяется ячейка периодичности – область сварки трубки в трубную доску. Предполагается, что эта область осесимметрична, “эффективный” диаметр ее  $d$ , определяется по формуле  $d_s = DK^{-1/2}$  ( $D$  – диаметр трубной доски,  $K$  – число трубок).

В случае ЗИА фирмы “Борзиг” осевое сечение ячейки показывается на рис. 18а. Здесь цифрами 1, 2, 3 помечены соответственно трубная доска, трубка, сварные швы; буквами  $\Gamma_g, \Gamma_l$  обозначены поверхности, контактирующие с газом и охлаждающей жидкостью;  $\Gamma_0, \Gamma_1$  – боковая и верхняя границы участков доски, трубки;  $n$  – внешняя нормаль.

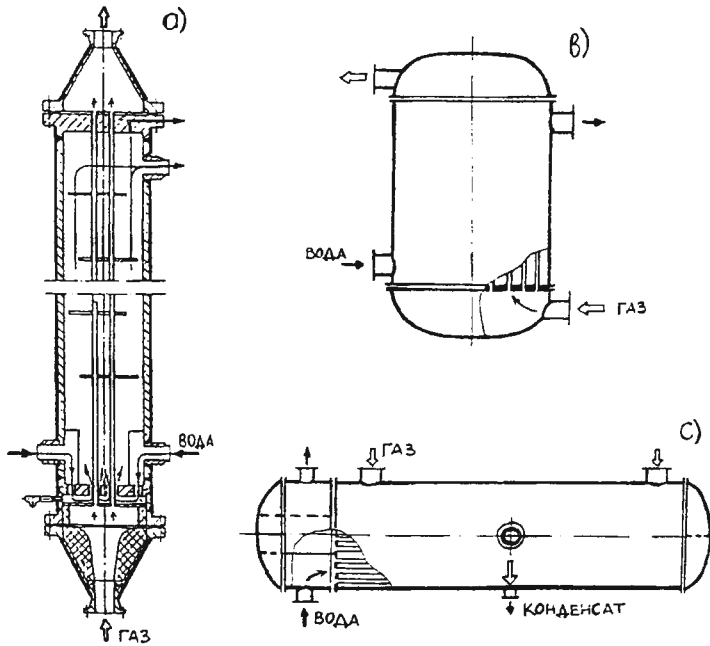


Рис. 17

Поскольку теплофизические характеристики материалов доски, трубки, сварных швов мало отличаются друг от друга, в дальнейшем они считаются одинаковыми. Полагается, что в местах касания трубок и досок тепловой контакт идеальный, на границах раздела сварных швов и соединяемых деталей тепловое сопротивление отсутствует. В результате, в цилиндрической системе координат  $r, z, \varphi$  поле температур  $\theta$  во всей области можно описать соотношением

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0. \quad (14)$$

В общем виде на поверхностях контакта тела с газом и жидкостью имеют место зависимости:

$$-\lambda_0 \frac{\partial \theta}{\partial n} = \begin{cases} \alpha_g (\theta - \theta_g) & \text{на } \Gamma_g; \\ \alpha_l (\theta - \theta_l) & \text{на } \Gamma_l. \end{cases} \quad (15)$$



Здесь  $\lambda_0$  – средний коэффициент теплопроводности металла;  $\alpha_0$ ,  $\alpha_l$  – коэффициенты теплообмена, определяемые с учетом характера движения газа и жидкости, наличия на  $\Gamma_l$  слоя накипи. В силу симметрии тепловых полей вблизи  $\Gamma_0$

$$\lambda_0 \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 \quad \text{на } \Gamma_0. \quad (16)$$

При большом удалении среза  $\Gamma_l$  от поверхности доски считается, что на  $\Gamma_l$  выполняется условие вида (16).

Данные модели дополняются, кроме того, соотношениями для оценок потоков газа во входных камерах теплообменников, напряженно-деформированного состояния (НДС) основных элементов аппаратов.

Расчеты, проведенные с помощью перечисленных моделей, показали, что нагрев трубных досок осуществляется, в основном, за счет конвективного теплообмена; радиационный теплообмен, в принципе, можно не учитывать. Тепловое поведение газа, движущегося в трубках, и внутренних стенок трубок разное. Температура газа при удалении от начала трубки достаточно быстро уменьшается, тогда как температура стенки остается почти неизменной, близкой к температуре охлаждающей жидкости. Характерные поля температур в мостиках трубных досок, сварных швах приводятся на рис. 18*а,с*. В последнем случае считается, что на поверхности  $\Gamma_l$  имеется слой накипи толщиной 0.0001м.

Расчетная схема входной камеры ЗИА фирмы “Борзиг”, распределение в зависимости от радиуса безразмерных скоростей (1 – поперечная, 2 – продольная составляющие, 3 – модуль скорости) газового потока вблизи трубной доски представляются на рис. 19*а,в*. Из этих данных видно, что мостики трубной доски обдуваются неравномерно.

Учитывая, что даже при нормальных температурных режимах напряжения в местах сварки трубок в доску близки к пределу прочности, необходимо, в первую очередь, выравнивать поток газа на трубной доске. В работе обсуждаются разные способы выравнивания. Применительно к ЗИА предлагается установка в центральной части входной камеры веретенообразного рассекателя. В ходе вычислительных экспериментов отыскиваются его рациональные форма и размеры. Показывается, что размещение рассекателя приводит к уменьшению максимальных скоростей потока вблизи доски приблизительно на 10 – 15%, способствует более равномерному распределению расхода газа по трубкам теплообменника.

Далее рассматриваются меры по непосредственной защите трубных досок с помощью экранов разной формы и термостойких покрытий (огнеупоров, эмалей, металлопокрытий). При применении их на ЗИА фирмы “Борзиг” максимальная температура доски может быть уменьшена приблизительно на 20%. Причем предпочтительными в этом случае из-за малых размеров мостиков являются эмалевые и металлические покрытия.

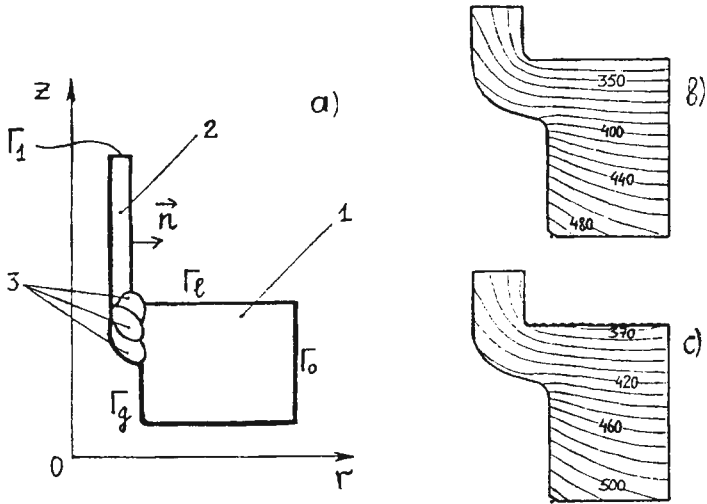


Рис. 18

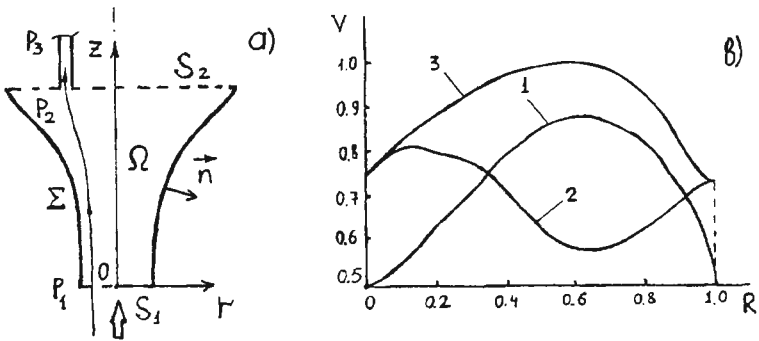


Рис. 19

Проведен также детальный анализ нагрева трубных досок котлов-утилизаторов, при защите которых в отверстия трубок вставляются гильзы, выступающие за поверхность доски, а сама доска обмуровывается со стороны газового потока огнеупорным составом заподлицо с концами этих гильз. В экспериментах варьируются температура газа, толщины доски и слоя футеровки, сопротивление нагара в зазоре между трубками и гильзами. Показывается, что при толщине футеровки порядка 0.025 м температурное поле в доске стабилизируется, не меняясь практически с увеличением толщины. Термическое сопротивление слоя нагара между стенками трубки и гильзы влияет, в основном, на температуру гильзы; средняя температура доски уменьшается за счет него не-

значительно (на 20 – 25°C). Низкая эффективность предлагаемых мер обусловлена, в первую очередь, большой толщиной доски, которая составляет в расчетах 0.1 м.

Следовательно, при реконструкции рассматриваемых котлов-утилизаторов необходимо, по возможности, уменьшить толщину нижней трубной доски; при установке гильз без нагара на внутренних стенках трубок использовать специальные изолирующие пасты. Желательно также, чтобы слой футеровки был бы не больше половины толщины доски.

Поле температур в сечении рекомендуемой системы, состоящей из части трубки и мостика 1 толщиной 0.05 м, гильзы 2, слоя футеровки 3 представляет на рис. 20а при повышенной температуре газа ( $\theta_g = 700^\circ\text{C}$ ) и наличии изолирующей прослойки между гильзой и трубкой. В отсутствие прослойки изотермы показываются на рис. 20в,с, причем на последнем в случае штатного значения  $\theta_g = 600^\circ\text{C}$ .

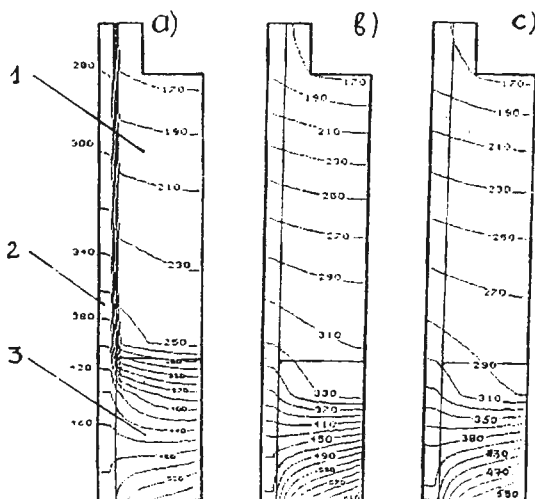


Рис. 20

Одной из причин сокращения сроков службы теплообменников является значительное науглероживание слоев металла, контактирующих с высокотемпературными газовыми потоками. Избежать этих нежелательных явлений можно, в частности, нанося на соответствующие участки мостиков, трубок, сварных швов защитные металлические покрытия. В работе обсуждаются три способа нанесения таких покрытий: термическое напыление, индукционная наплавка и наплавка погружением (окунанием) изделия в расплав.

В случае наплавки погружением основные трудности состоят в предварительной подготовке изделий к окунанию, защите их поверхностей перед контактом с жидким металлом, в поддержании необходимого температурного ре-

жима. Для того, чтобы избавиться от большинства из них, предлагается воспользоваться электрошлаковым методом подогрева обрабатываемых поверхностей (рис. 21а). Оценки температурных полей, полученные на основе соответствующей модели, подтверждают возможность применения данного способа.

Анализ процессов, протекающих при последующем контакте изделия (твердого тела) с расплавом, осуществляется с помощью расчетной схемы, показанной на рис. 21в. Здесь первый слой – расплав, второй – твердое тело.

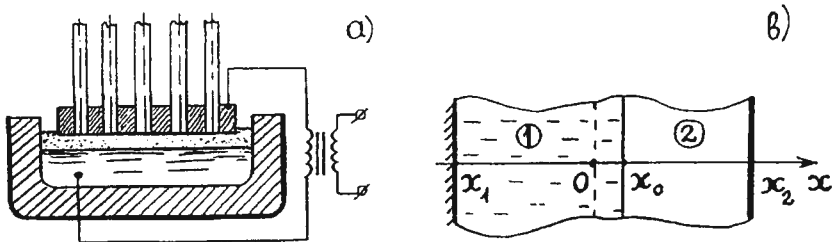


Рис. 21

Граница между ними считается подвижной, положение ее определяется величиной  $x_0 = x_0(t)$  ( $x_0(0) = 0$ ). В обоих слоях перенос тепла описывается уравнением

$$c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (17)$$

с граничными условиями:

$$x = x_1: \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = \alpha_1 (\theta - \theta_T),$$

$$x = x_0: \quad \theta = \theta_\phi, \quad \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x_0+0} - \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x_0-0} = \rho L v; \quad (18)$$

$$x = x_2: \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\alpha_2 (\theta - \theta_C),$$

где  $c$  – теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\rho$  – плотность;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплообмена;  $\theta_\phi, \theta_T, \theta_C$  – температуры фазового перехода, наружных сред;  $L$  – скрытая теплота плавления;  $v \equiv dx_0/dt$  – скорость движения фронта плавления (кристаллизации).

В начальный момент времени  $t = 0$

$$\theta(x, 0) = \begin{cases} \theta_{10}, & x_1 \leq x < 0; \\ \theta_{20}, & 0 < x \leq x_2. \end{cases} \quad (19)$$

Задача (17) – (19) решается методом конечных разностей с использованием итерационной процедуры для отыскания скорости  $v$ , в которой условие Стефана на  $x = x_0$  выступает в качестве критерия сходимости.<sup>2</sup> При выполнении вычислительных экспериментов варьируются значения параметров  $\lambda$ ,  $\alpha_2$ ,  $\theta_c$ ;  $\alpha_1 = 0$ ,  $\theta_{10} = 2000^\circ\text{C}$ ,  $\theta_{20} = 0^\circ\text{C}$ ,  $\theta_\phi = 1500^\circ\text{C}$ ; толщины слоев расплава, твердого тела полагаются равными 0.35 и 0.05 м.

Из полученных данных следует, что после контакта слоев вначале происходит кристаллизация расплава, затем межфазная граница движется в обратном направлении. При перемешивании расплава время теплового цикла может быть существенно уменьшено. Показывается также, что после достижения межфазной границей исходного положения, направление ее движения может быть обращено за счет охлаждения внешней поверхности тела ( $x = x_2$ ), а на самом теле может быть наплавлен слой требуемой толщины. Сказанное иллюстрируют рис. 22, где представлена динамика фронта плавления – кристаллизации  $x = x_0$  в случае теплоизолированных границ  $x = x_1$ ,  $x_2$  без перемешивания (1), с перемешиванием (2) расплава (рис. 22а) и при охлаждении поверхности тела ( $\theta_c = 300^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_2 = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ) начиная с моментов времени  $t_k = 0.0, 12.0, 24.0, 26.0$  мин (рис. 22б).

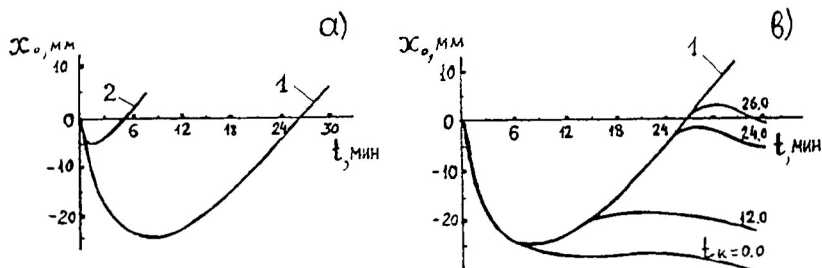


Рис. 22

Последний круг вопросов, обсуждаемых в настоящем разделе, касается способов интенсификации движения охлаждающей жидкости. В ЗИА фирмы “Борзиг” котловая вода предварительно поступает в зазор между нижней и средней трубными досками через два расположенных диаметрально (напротив друг друга) патрубка (рис. 17а). При этом струи соударяются в центральной части, движение воды в этой области замедляется. Чтобы обеспечить интенсивное омывание нижней доски предлагается, во-первых, установка на выходе из патрубков поворотных экранов либо поворот самих патрубков таким образом, чтобы обеспечить закрутку потока. Во-вторых, для облегчения выхода пароводяной смеси несколько труб вблизи оси теплообменника можно укоротить, освободив отверстия в средней трубной доске. Расчеты показывают, что, в ча-

<sup>2</sup> Мазо А.Б. Численное решение задачи для нелинейного уравнения параболического типа с вырождением на подвижной границе // Иссл. по прикл. матем., вып. 11. – Казань, Изд.-во. КГУ, 1984, – С 111 – 123.

стности, при обрезании таким образом 12 трубок, скорости охлаждающей жидкости в центральной части возрастают приблизительно на 40%, на периферии доски – на 15%.

В рассматриваемых конденсаторах (рис. 17с) вода, подаваемая через боковые патрубки, четырежды проходит по трубкам, преодолевая большое гидравлическое сопротивление. Парогазовая смесь движется в межтрубном пространстве. Поскольку газы содержат частички кокса и других примесей, они забивают зазор между трубками, что, в конечном счете, приводит к отказам этих теплообменников.

Для того, чтобы избавиться от названных недостатков, предлагается изменить области действия сред, направив охлаждающую жидкость в межтрубное пространство, а парогазовую смесь – в трубки. Котловая вода при такой реконструкции, поступая в центральный патрубок, сильно перемешивается, что интенсифицирует теплообмен. Затем достаточно быстро вытекает с минимальными гидравлическими потерями через два верхних патрубка. Парогазовая смесь в трубках также может двигаться беспрепятственно, если их не закупорит конденсат.

Оценка толщины слоя конденсата производится расчетным путем, на основе предложенной математической модели. При этом принимаются следующие допущения: профиль слоя конденсата формируется благодаря фазовому переходу из пара в воду на границе раздела газ – жидкость и воздействию на него потока парогазовой смеси; среды считаются вязкими, движение их турбулентное, установившееся и плоскопараллельное.

Интегрирование соответствующей системы нелинейных уравнений осуществляется численно, в частных случаях находят аналитические решения. Согласно полученных данных при штатных значениях входных параметров на выходе из трубок толщина слоя конденсата составляет 0.15 – 0.25 часть их радиуса, масса конденсирующейся воды будет равна 0.4 – 0.45 от общей массы парогазового потока, температура воды 93°C, парогазовой смеси 96°C. Эти данные согласуются с характеристиками исходного конденсатора, поэтому реконструкция его названным способом вполне возможна.

В пятом разделе анализируется работа электродуговых печей (ЭДП). Дуговая печь – сложный агрегат, оборудованный большим числом узлов и механизмов, сетью электрических, воздушных, газо-кислородных коммуникаций, водо- и газоочистными сооружениями, приборами контроля и автоматики. Собственно печь, схематично показанная на рис. 23, состоит из пола 1, боковых стенок 2, куполообразного свода 3, электродов 4.

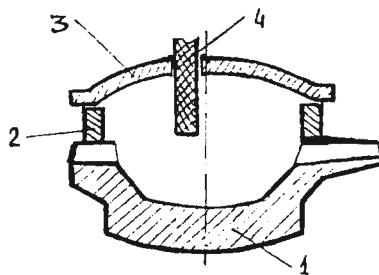


Рис. 23

В ходе плавки выделяются следующие периоды: заправка печи, завалка шихты, плавление шихты, окислительный и восстановительный периоды, выпуск расплава. Рассмотрим подробнее технологические стадии плавки: плавление шихты, окислительный и восстановительный периоды.

После включения печи, под действием высокой температуры дуг, шихта начинает плавиться, образуется три колодца (в случае сверхмощных печей – практически один общий). Расплавленный металл стекает вниз. При дальнейшем нагреве шихты она расплавляется, толщина слоя жидкого металла увеличивается. На этом этапе плавки возможны осадка, обрушение отдельных частей шихты. Расплавление считается законченным, когда вся твердая шихта окажется расплавленной, а металл нагрет до требуемой температуры ( $\sim 1480 - 1520^\circ\text{C}$ ).

Перед началом окислительного периода производится скачивание большей части шлака. Затем в печь присаживаются известь, шамотный бой или бокситы; в течение всего периода вводится порциями железная руда. Поскольку только в хорошо прогретой ванне удастся обеспечить эффективное окисление углерода и интенсивное кипение расплава, в этот период исключительно большое значение приобретает поддержание необходимого теплового режима.

При проведении восстановительного периода осуществляется раскисление металла, доведение его температуры и химсостава до заданного.

В силу сложности процессов, протекающих при плавке в ЭДП, управление ими с помощью АСУ ТП представляет определенные трудности. Ситуацию усугубляет малое число контролируемых параметров, недостаточное количество датчиков и измерительных устройств, высокий уровень помех. В данных условиях особенно важна роль математических моделей, используемых в АСУ ТП плавки.

В настоящее время применительно к плавке металла в электродуговых печах имеется много математических моделей разного уровня. Предлагаемые в работе модели отличаются от них тем, что они описывают более подробно все технологические стадии плавки, в них нашли отражение электрические режимы работы печи, тепловое поведение электродов, подины, стенок и свода печи, шихты, шлака, жидкого металла, печного газа; учитывается движение жидкой и газообразной сред, воздействие электромагнитных полей на металл ванны.

Поскольку при автоматизированном управлении плавкой в ЭДП основными управляющими и контролируемыми параметрами являются характеристики электрической цепи печи, предварительно рассматриваются схемы их замещения, записываются уравнения баланса напряжений и условие несжимаемости токов. При этом в проводниках учитывается скин-эффект.

Расчеты, выполненные с помощью предложенных методик, показали, что учет скин-эффекта приводит к уменьшению найденных значений мощности, коэффициента мощности дуг приблизительно на 6 – 7%, их максимумы смещаются в область больших токов. Критический ток, определяющий момент перехода к прерывистому горению дуг, увеличивается. Отметим, что подобные закономерности наблюдаются и в экспериментах.

Далее рассматриваются тепловые, гидрогазодинамические процессы, протекающие при плавке. Ради простоты считается, что внутренние и наружные поверхности стенок печи гладкие, отдельные конструктивные элементы, расположенные на них, во внимание не принимаются. Выпускное отверстие для выхода печных газов (четвертое отверстие свода) предполагается расположенным по оси печи.

В период проплавления колодцев и расплавления шихты печь представляется в виде, показанном на рис. 24. Здесь выделяются: центральная часть, состоящая из электрода, дуги, слоя металла, расположенного вдоль оси симметрии; печной газ ( $\Omega_g$ ); металл в твердом ( $\Omega_s$ ) или жидком ( $\Omega_l$ ) состоянии, стенки печи. После полного расплавления шихты, во время окислительного и восстановительного периодов область  $\Omega_s$  из рассмотрения исключается, зато добавляется слой шлака  $\Omega_{sh}$  (рис. 24).

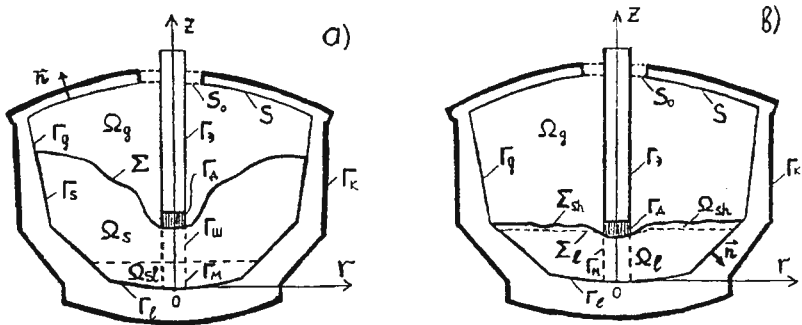


Рис. 24

Для каждой из этих областей записываются соответствующие тепловые задачи, в  $\Omega_g$  и  $\Omega_l$  дополнительно – гидродинамические. При этом особое внимание обращается на определение теплофизических параметров шихты. Считается, что элементарный объем, занимаемый шихтой, состоит из кусков, непрерывных в направлении теплового потока и разрывных вдоль него, а также промежутков между ними, заполненных печным газом. В результате для эффективного коэффициента теплопроводности шихты получается формула

$$\lambda_s = (1 - \chi_{\Pi})\lambda_m + \chi_{\Pi} (R_m + \chi_{\Pi}(R_{\Pi} - R_m)). \quad (20)$$

Здесь  $\chi_{\Pi}$  – отношение площади пустот сечения, поперечного к тепловому потоку, к общей площади сечения;  $\chi_{\Pi}$  – отношение длины пустот вдоль продольной линии к общей длине;  $R_m = \lambda_m^{-1}$ ,  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности металла;  $R_{\Pi} = (4\sigma\epsilon_{\Pi}\gamma_{\Pi}d_{\Pi}\theta_{\Pi}^3)^{-1}$ ,  $\sigma$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\epsilon_{\Pi}$  – поправка на неполную черноту стенок,  $d_{\Pi}$  – эквивалентный размер пор в направлении теплового потока,  $\gamma_{\Pi}$  – фактор формы пор ( $0 < \gamma_{\Pi} < 1$ ),  $\theta_{\Pi}$  – температура стенок.



Кроме того, данные задачи дополняются оценками скорости  $w$ , смещения поверхности шихты  $\Sigma$  при ее плавлении, времени расплавления кусков шихты в области  $\Omega_{\text{ш}}$  (рис. 24); приводятся аналитические решения для определения динамики проплавления в шихте колодцев, нагрева стенок печи.

При анализе следующей после проплавления колодцев стадии – расплавления шихты, в качестве первоочередной выделяется задача лучистого теплообмена в свободном пространстве печи. В ней, в свою очередь, различаются следующие случаи лучистого теплообмена:

- при закрытом своде между шихтой, шлаком, внутренними поверхностями свода и стен печи;
- при открытом своде в незамкнутой системе поверхностей шихты, шлака, гарнисажа и футеровки, а также внутренней поверхности свода с окружающей средой;
- между поверхностью шихты и контактирующим с ней гарнисажем или футеровкой.

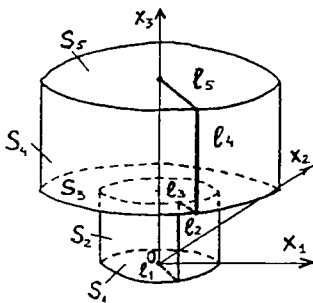


Рис. 25

При условии, что газовая атмосфера печи лучепрозрачна, внутренние поверхности печи, шлака, шихты обладают диффузионными свойствами, излучение – серое, в двух последних случаях находятся аналитические решения; в первом же случае известное уравнение переноса лучистой энергии для упрощенной формы свободного пространства печи (рис. 25) интегрируется с помощью квадратурных формул центральных прямоугольников.

На рис. 26 показывается изменение плотности результирующего излучения  $E$  вдоль образующей  $l$  в ДСП-50. Видно, что максимальную тепловую нагрузку испытывает зер-

кало расплава, на его поверхности наблюдается наибольшая температура. В смысле перегрева футеровки наиболее опасным участком является область вблизи центра свода.

По окончании стадии расплавления, в окислительный и восстановительный периоды в результате действия на поверхность ванны жидкого металла давления газов, магнитного давления дуги, реактивного давления испаряющегося металла и других факторов в окрестности дуги образуется лунка (мениск). Эффект заглабления дуги может существенно повлиять на распределение ее энергии по пространству печи, поэтому важно определить размеры и форму мениска. В работе представляются аналитические зависимости, достаточно точно описывающие его параметры. Приводятся также типичные поля скоростей течения расплава металла под действием электромагнитных сил, движения печного газа в свободном пространстве.

Анализ полученных результатов, закономерностей плавки позволил сконструировать упрощенную модель, согласно которой весь процесс разбивается на два этапа:

- плавления шихты с образованием в нижней части печи расплава, содержащего твердую фазу;
- плавления твердой фазы и нагрева расплава до нужной температуры.

Согласно этой модели с помощью аналитических зависимостей находятся тепловые нагрузки на все внутренние участки печного пространства, их температура; оцениваются динамика расплавления шихты, характерные временные периоды.

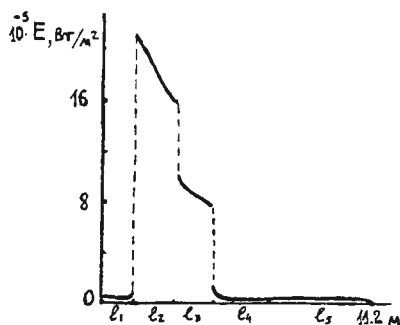


Рис. 26

В заключительной части настоящего раздела рассматриваются вопросы применения данных моделей в АСУ ТП плавки. Приводятся алгоритмы диагностики, определения состояния электрической цепи ЭДП, ее симметрирования, оптимального регулирования. При диагностике предлагается использовать эксплуатационные короткие замыкания электродов на ванну жидкого металла; выбор критериев симметрирования характеристик цепи по фазам зависит от периода плавки. В первой половине плавки, когда в печи находится достаточное количество шихты, следует выравнивать как дуговые напряжения, так и мощность дуг. По мере расплавления шихты, с ростом тепловой нагрузки на стенки печи, необходимо выравнивать лучистую энергию дуг. При оптимальном регулировании электрическими режимами плавки выделяются две наиболее важные задачи: управление с максимальной производительностью печи и с минимальной энергоемкостью плавки. В первом случае оптимальные уставки цепи находятся из условия  $dP_d/dR = 0$ , где  $P_d$  — мощность дуг,  $R$  — полное активное сопротивление цепи; во втором случае — при достижении максимального к.п.д. плавки  $\eta = (P_d - P_{пт}) / (P_d + P_{пз})$  ( $P_{пт}, P_{пз}$  — мощность тепловых, электрических потерь).

Далее предлагается важная для управления модель баланса дуги, определяющая связь между лучистой частью мощности дуги  $q_0$  и характеристиками цепи  $U, I$ :

$$q_0 = P_d(U, I) \left( 1 - \sigma / (P_d(U, I) - \sigma) \right) \quad (21)$$

( $\tau, \sigma$  — адаптационные параметры); перечисляются основные ограничения, дополняющие критерии оптимального управления плавкой; выделяется ряд типичных ситуаций, облегчающих выбор оптимальных графиков переключения ступеней напряжения трансформатора и уставок фазных токов.

В заключении подведен краткий итог выполненной работы, намечены направления перспективных исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате выполнения настоящей работы развит принцип модернизации теплотехнического оборудования, заключающийся в широком применении методов математического моделирования при оценке его состояния, представлении предложений по улучшению конструкций, оптимизации их параметров и режимов. При этом выявлена общность в устройстве и работе волновых насосов, градирен, теплообменников, электродуговых печей; записаны математические модели, разработаны методы, позволяющие исследовать протекающие в них процессы с единых позиций.

2. Расчет течений идеальной жидкости в волновых насосах показал, что при совпадении скоростей набегающего потока и волны течение близко к равномерному. Если же скорости различаются, появляются значительные возмущения, особенно вблизи неподвижных кромок поршня.

Учет вязкости жидкости позволил оценить интенсивность вихреобразований в потоке, дал возможность выявить режимы колебаний стенок, когда на оси насоса возвратные течения не возникают.

3. Для описания совокупности процессов, протекающих при охлаждении оборотной воды в градирнях, предложен ряд моделей, основной из которых является модель движения воздуха. Особенность ее состоит в том, что все пространство внутри градирни считается пористой средой.

С помощью данных моделей, реализованных в виде программного комплекса, найдены рациональные формы оросителя и пластин каплеуловителя, показано положительное влияние воздухонаправляющих щитов на аэродинамику потоков в градирне, температуру выходящей воды. Подтверждена высокая эффективность предложенной комбинированной системы охлаждения воды, возможность реконструкции на ее основе исходной вентиляционной градирни СК-1200 в башенную.

4. Среди математических моделей, использованных при анализе работы теплообменников (закально-испарительных аппаратов фирмы "Борзиг", котлов-утилизаторов, конденсаторов) и предложений по их модернизации, следует выделить модели для расчета тепловых потоков во входных камерах на основе электрической аналогии, течений газа в них, образования слоя конденсата на стенках трубок, нагрева мостиков трубных досок с учетом накипи и защитных покрытий. Представляют также интерес модели подогрева решеток теплообменников электрошлаковым способом и динамики межфазной границы при нанесении на рабочие поверхности досок защитных металлических покрытий методом окунания в расплав.

В результате численных экспериментов, выполненных с применением названных моделей, показано, что в высоконагруженных теплообменниках (ЗИА, котлы-утилизаторы) нагрев трубной доски осуществляется, в основном, конвекцией. Радиационный теплообмен повышает ее температуру незначительно (приблизительно на  $15^{\circ}\text{C}$ ). При этом более всего нагреваются кромки входных отверстий, температура их заметно увеличивается за счет накипи.

Как и следовало ожидать, осевая составляющая скорости газового потока во входной камере достигает максимума вблизи центра доски. Однако максимум модуля скорости располагается почти по середине ее радиуса. Установка в камере веретенообразного рассекателя уменьшает эти значения, способствует более равномерному распределению газа по трубкам теплообменника.

Расчетным путем подтверждена высокая эффективность защитных экранов и футеровки. Найден оптимальные размеры системы из гильзы и слоя футеровки, предохраняющие трубные доски котлов-утилизаторов от перегрева. Определены рациональные режимы наплавки термостойких металлических покрытий методом окупания.

5. Модели, предложенные для описания процессов, протекающих при плавке в ЭДП, ориентированы на применение в АСУ ТП высокого уровня. Поэтому, в отличие от общепринятых, в этих моделях учитывается скин-эффект; металлошихта считается трехфазной средой; характеристики тепловых полей, потоков жидкого металла и газа в печи предполагаются зависящими от пространственных координат.

Получены также важные зависимости для оценки коэффициента теплопроводности, температуропроводности, скорости смещения поверхности шихты при ее плавлении; параметров мениска, образующегося на поверхности расплава под дугами. На базе данных моделей и зависимостей разработаны эффективные алгоритмы оптимального поддержания электрических режимов, управления плавкой в целом.

#### **Результаты диссертации изложены в следующих публикациях:**

1. Федяев В.Л. Об условиях на поверхности тонких проницаемых тел, обтекаемых вязкой жидкостью//Гидроупругость оболочек. Труды семинара КФТИ КФ АН СССР. – Казань, 1983, вып. 16. – С. 107 – 115.
2. Федяев В.Л. О граничных условиях на поверхности контакта проницаемого тела и вязкой жидкости//Респ. науч.-техн. конф. "Механика сплошных сред": Тез. докл. – Набережные Челны, 1982. – С. 46.
3. Федяев В.Л. Движение деформируемого тела в вязкой несжимаемой жидкости//Статика и динамика оболочек. Труды семинара КФТИ КФ АН СССР. – Казань, 1977, вып. 8. – С. 123 – 129.
4. Федяев В.Л. О динамическом взаимодействии мягкой оболочки с вязкой несжимаемой жидкостью//Нелинейные проблемы аэрогидроупругости. Труды семинара КФТИ КФ АН СССР. – Казань, 1979, вып. 11. – С. 166 – 175.
5. Федяев В.Л. Движение деформируемого тела вращения в вязкой несжимаемой жидкости//Нелинейные проблемы аэрогидроупругости. Труды семинара КФТИ КФ АН СССР. – Казань, 1979, вып. 11. – С. 158 – 165.
6. Федяев В.Л. Об одном способе решения задачи движения жидкости, вызванного колебаниями поверхности цилиндра//Труды семинара по теории оболочек КФТИ КФ АН СССР. – Казань, 1975, вып. 6. – С. 174 – 185.
7. Ильгамов М.А., Сулейманова М.М., Талдыкин М.В., Федяев В.Л. Об одной модели вольного движителя//Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 241, № 2. – С. 309 – 311.
8. Ильгамов М.А., Федяев В.Л. О движении деформируемого тела в вязкой несжимаемой жидкости//IX Междунаро. конф. по нели. колебаниям. Прилож. методов теории нели. колебаний в механике, физике, электротехнике, биологии. Труды. – Киев, Наукова думка. – 1984, т. 3. – С. 113 – 116.

9. Ильгамов М.А., Федяев В.Л., Снигерев Б.А. Применение метода конечных элементов в задачах биогидромеханики с подвижными границами// Всесоюз. симп. "Нелин. теория тонкостенных конструкций и биомеханика". Труды. – Кутаиси-Ткибули, 1985. – С. 236 – 241.
10. Федяев В.Л., Снигерев Б.А., Калмыков В.Н. Применение метода конечных элементов для расчета потенциальных потоков в каналах, содержащих колеблющиеся тела//Динамика оболочек в потоке. Труды семинара КФТИ КФАН СССР, 1985, вып. 18. – С. 134 – 143.
11. Федяев В.Л., Снигерев Б.А. О течении идеальной жидкости в каналах с деформирующимися стенками//Динамика оболочек в потоке. Труды семинара КФТИ КФАН СССР, 1985, вып. 18. – С. 125 – 133.
12. Снигерев Б.А., Федяев В.Л. К расчету потенциальных потоков в каналах с подвижными границами методом конечных элементов//Акт. задачи мех. сплошных сред. Межвуз. сб. – Чебоксары, 1986. – С. 99 – 102.
13. Талдыкин М.В., Федяев В.Л., Серазетдинова Г.В. О потоках жидкости вблизи волнообразно деформируемых пластин // Взаимодействие оболочек со средой. Труды семинара КФТИ КФАН СССР. – Казань, 1987, вып. 20. – С. 118 – 123.
14. Ильгамов М.А., Федяев В.Л., Талдыкин М.В. Вызванное движение деформируемых тел в вязкой жидкости//П Всесоюз. конф. "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике". Тезис. докл. – Киев, 1985. – С. 103 – 105.
15. Снигерев В.А., Федяев В.Л. Исследование потоков вязкой несжимаемой жидкости в каналах с помощью метода конечных элементов//Взаимод. оболочек со средой. Труды семинара КФТИ КФАН СССР. – Казань, 1987, вып. 20, часть I. – С. 105 – 117.
16. Серазетдинова Г.В., Снигерев Б.А., Талдыкин М.В., Федяев В.Л. О прокачивании жидких сред волновыми насосами//VII Всесоюз. съезд по теоретич. и прикл. механике: Аннот. докл. – Москва, 1991. – С. 315.
17. Fedyaev V.L., Mazo A.B., Snigerev B.A., Khabihullina V.I. The use of modeling methods for solving problems in efficiency improvement of graduation towers//IV Int. conf. "Lavrentyev readings on math., mech. and phys. Abstr.", Kazan, 1995. – P. 109.
18. Федяев В.Л., Симонов В.Ф., Хисматуллин Н.И., Мустафин Х.В., Шишкин А.А., Неверов А.В. Блок водоуловителя градири/Свид. РФ на полезную модель № 9059 зар. 16.01.1999. – Москва, 1999. – 4 с.
19. Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И., Шайморданов И.Г., Федяев В.Л., Реутов С.Л., Ястребов М.М., Киреев Ю.А., Комиссаров А.П., Якимов Е.В., Шишкин А.А., Ибатуллин Б.Л. Лопасть вентилятора градири/Патент РФ № 2101640 зар. 10.01.1998. – Москва, 1998. – 5 с.
20. Федяев В.Л., Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Реутов С.Л., Ястребов М.М., Киреев Ю.А., Комиссаров А.П., Якимов Е.В., Шишкин А.А., Хисматуллин А.Н. Вентилятор для градири/Патент РФ № 2123139 зар. 10.12.1998. – Москва, 1998. – 8 с.
21. Федяев В.Л., Хуснутдинов Р.А., Богоманов А.М. Отчет по замерам технологических параметров градири завода СПС Т-792/2 брызгальной и Т-792/3 с полимерной начинкой//Итоги VII Межд. конф. по энергосб. при модернизации градири. – Нижнекамск, 1999. – С. 42 – 43.
22. Федяев В.Л., Мазо А.Б., Снигерев Б.А., Хабибуллина В.И. О моделировании процессов тепломассообмена в градириях с брызгальной системой охлаждения воды//Школа-семинар "Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении". Труды. – Казань, 1999. – С. 10 – 12.
23. Ибатуллин Б.Л., Гараева Г.Б., Мазо А.Б., Федяев В.Л., Снигерев Б.А. Исследования и разработка мероприятий по повышению ресурса и надежности котлов-утилизаторов этиленового производства//Мат. докл. Итоговой науч. конф. проф.- препод. состава КФ МЭИ, Казань, 1995. – С. 109 – 110.
24. Мазо А.Б., Федяев В.Л., Ибатуллин Б.Л. Особенности теплообмена вблизи границы жидкой ванны при больших скоростях сварки//Сб. науч. тр. "Интенсиф. процессов тепломассообмена в энергет. и техн. уст." № 201. М.: МЭИ. – 1989. – С. 45 – 51.

25. Мазо А.Б., Федяев В.Л., Хисматуллин Н.И. Расчет динамики межфазной границы при контактном плавлении металлов//Модел. нел. проц. в механике и теплотехнике. Труды семинара КФТИ КФАН СССР. – Казань, 1989. Вып. 24. – С. 66 – 77.
26. Осипов П.П., Федяев В.Л. Математическое описание процессов, протекающих при плавке в электрических дуговых печах//Обзоры иссл. по механике сплошной среды. ИММ КНЦ РАН, Казань, 1995. – С. 161 – 164.
27. Мазо А.Б., Федяев В.Л., Ибатуллин Б.Л., Снигерев Б.А. Моделирование процессов горячей обработки металлов//Обзоры иссл. по механике сплошной среды. ИММ КНЦ РАН, Казань, 1995. – С. 165 – 173.
28. Fedyaev V.L., Mazo A.B., Ibatullin B.L. Mathematical modelling of thermohydrodynamic processes under the influence of concentrated energy stream on materials//Int. conf. on advanced and laser technologies ALT – 92, Moscow, 1992. – P.3 – 4.
29. Осипов П.П., Федяев В.Л. К вопросу о проплавлении сплошной среды концентрированным источником лучистой энергии//Моделирование нел. процессов в механике и теплотехнике. Труды семинара КФТИ КФАН СССР, Казань, 1989, вып. 24. – С. 133 – 142.
30. Осипов П.П., Федяев В.Л. Об организации плавления шихты по оптимальному режиму в электропечах//Сталь. – М.: Металлургия, 1994, № 6. – С. 41 – 44.
31. Ибатуллин Б.Л., Федяев В.Л., Серазетдинова Г.В., Романовский Р.К., Полуаршинов В.А. Об одном критерии бездефектного формирования швов при сварке плавлением//Высокоэффект. технологии обработки материалов в энергетике. Сб. науч. тр. МЭИ, Москва, 1989, № 207. – С. 68 – 74.
32. Osipov P., Taziukov F., Fedjaev V. Computer modelling of optimal control of electric arc furnace//Proc. V Int. Ener. Conf. EEPGEX-93, Seoul, Korea, 1993. – P. 155 – 169.
33. Osipov P., Tazioukov F., Fedjaev V. Optimal control of electric arc furnace as Marcov's process//Proc. Electric furnace conf., Nashville, USA, 1994. – P. 199 – 209.
34. Федяев В.Л., Моренко И.В. Анализ работы инерционных улавливающих устройств//Труды I Межд. конф. "Модели механики сплошной среды, вычис. технологии и автом. проект. в авиа- и машиностроении." Том 1. – Казань: Изд-во КГТУ. – 1997. – С. 183 – 187.
35. Федяев В.Л. Математическое моделирование рабочих процессов и реконструкция теплообменников. Препринт КМО №2001. Казань: Изд-во Каз. мат. об-ва, 2001. – 78 с.
36. Федяев В.Л., Снигерев Б.А., Аристова Е.Ю. Течение жидкости в канале с подвижными границами//Труды школы-семинара "Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении." – Казань, 2000. – С.143 – 144.



22.05.2004г.

**ФЕДЯЕВ Владимир Леонидович**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

2-